

Beschattung als Klimawandelanpassungsmaßnahme – Einfluss auf die Fließgewässertemperatur mittelgroßer Flüsse, am Beispiel der Krems

CLEMENS HOLZER-SALCHER | LUKAS REIDER

REVITAL Integrative Naturraumplanung GmbH, Nußdorf 71, 9990 Nußdorf-Debant

PETER ANDERWALD

Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung
Wasserwirtschaft, Kärntnerstraße 10–12, 4021 Linz

1 Einführung

1.1 Projekt & Projektziele

Durch den Klimawandel werden für die meisten Fließgewässer steigende Gewässertemperaturen erwartet (van Vliet et al., 2013; MacDonald et al., 2014; Hannah & Garner, 2017). Selbst bei konservativen Szenarien (siehe IPCC, 2013) zeigen die meisten globalen Klimamodelle einen Anstieg der globalen Flusstemperaturen um ca. 1,0–3,0 °C bis 2100 (Dugdale 2018).

In der Studie »Auswirkung der Klimaveränderung auf die Fischzönosen öö. Fließgewässer« (Keil et al. 2018) wurde die Erwärmung oberösterreichischer Gewässer umfangreich untersucht. Im Zeitraum 1984 bis 2015 betrug die durchschnittliche Erwärmung 0,043 °C pro Jahr bzw. 1,33 °C im gesamten Beobachtungszeitraum. Besonders ausgeprägte Temperaturanstiege sind in den Sommermonaten zu verzeichnen. In den beiden Trockenjahren 2018 und 2019 hat sich die Entwicklung zu erhöhten Wassertemperaturen noch verstärkt.

Die Analyse der Monitoringdaten für das Qualitätselement Fische im Zuge der Zustandsbewertung für den NGP 2021 hat gezeigt, dass die Fischbiozönose in thermisch sensiblen Gewässern bereits stark reagiert. In einzelnen Gewässerstrecken – insbesondere der Äschenregion – waren schon Verschiebungen, um eine ganze Fischregion zu verzeichnen und ist die namensgebende Leitfischart dort bereits verschwunden. Somit gewinnen Klimawandelanpassungsmaßnahmen zunehmend an Bedeutung.

Laut Garner et al. (2017) können solche Maßnahmen zur Anpassung sowie Minderung der Auswirkungen der Klimaerwärmung die Bepflanzung der Ufer mit hochwachsenden Gehölzen (z. B. Imholt et al., 2013; Ryan et al., 2013), die Wiederverbindung von Flüssen mit ihren Überschwemmungsgebieten (z. B. Poole et al., 2008; Opperman et al., 2010), die Wiederherstellung oder die Verbesserung des hyporheischen Austauschs (Beechie et al., 2013; Kurylyk et al., 2014), Verringerung des städtischen Abflusses (z. B. Booth und Leavitt, 1999) und die Verringerung der Wasserentnahmeraten (Poole und Berman, 2001) sein.

Mit der vorliegenden Studie sollte an zwei besonders von der Gewässererwärmung betroffenen Flüssen, der Aschach und der Krems, untersucht werden, welche Abkühlungs- bzw. Erwärmungseffekte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Beschattungsformen und Beschattungsintensitäten bzw. fehlender Beschattung festgestellt werden können.

Die vorliegende Studie fokussiert sich auf die Ergebnisse an der Krems aus der Messperiode im Jahr 2022, die Ergebnisse der Aschach werden im Ergebnisteil dazu genutzt, die an der Krems gewonnenen Erkenntnisse zu plausibilisieren.

Insgesamt wurde sowohl im Sommer 2021 als auch im Sommer 2022 eine Messperiode durchgeführt. Da die Wetterverhältnisse im Sommer 2021 durchwegs wechselhaft waren und somit nicht die für die Aussagen benötigten Hitzeperioden erfasst werden konnten, wurde im Sommer 2022 (26. 5. 2022 bis 8. 8. 2022) eine zweite Messkampagne gestartet. In der ausgedehnten Messkampagne im Sommer 2022 konnten an der Krems 15 Tage mit Lufttemperaturen über 28 °C und mehr als 12 Sonnenstunden erfasst werden.

1.2 Projektaufbau

Um die Bedeutung von unterschiedlichen Beschattungstypen entlang von Fließgewässern auf die Gewässertemperatur quantitativ und qualitativ zu erfassen, wird für die Studie ein integrativer Ansatz gewählt, der GIS-Modellierungen und hydrologische Feldstudien verknüpft. Die folgende Graphik (*Abbildung 1*) zeigt den entsprechenden methodischen Ansatz.

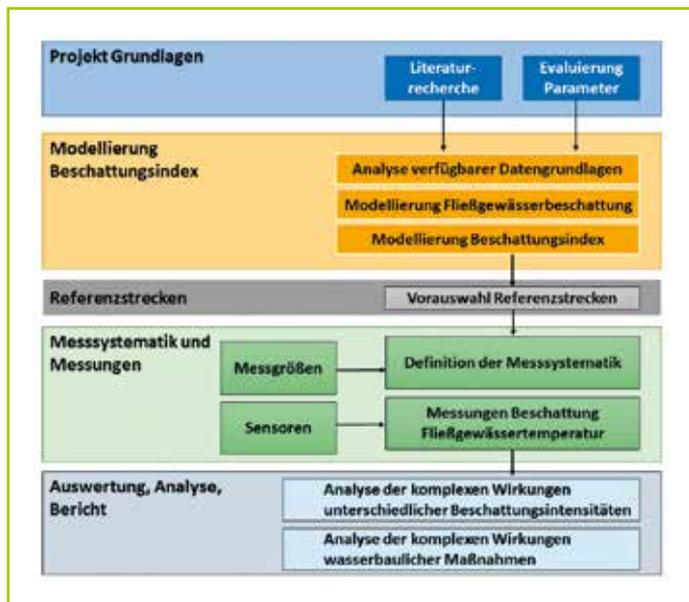


Abbildung 1:
Schematischer Ablauf
der Studie.

Das methodische Grundkonzept zur Ermittlung des Einflusses von Beschattung auf die Gewässertemperatur baut auf der Modellierung der Beschattungsformen und Beschattungsintensitäten entlang des Projektgewässers auf, da damit einerseits die Analyse bzw. Interpretation der gewonnenen Messdaten wesentlich verbessert und

andererseits auch eine gewisse Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gewässer leichter entwickelt werden kann.

Aufbauend auf dem modellierten Beschattungsindex werden Referenzabschnitte in den Gewässern ausgewählt, in denen der Einfluss von unterschiedlichen Beschattungsformen auf die Temperatur im Gewässer gemessen wird.

1.3 Gewässer

Die Krems erstreckt sich über eine Länge von 62 km und entspringt am Fuß der Kremsmauer auf 580 m ü. A. (vgl. *Abbildung 2*) Bis Kirchdorf weist die Krems ein Gefälle von 2 bis 4 % auf, welches sich im weiteren Verlauf allerdings auf 5,3 ‰ verringert.

Die Krems hat einige kleinere Zuflüsse und erreicht im Unterlauf einen mittleren Abfluss von rund 5,9 m³/s. Die Barbenregion (Epipotamal mittel) im Unterlauf reicht bis zur Einmündung des Sulzbaches, die anschließende Äschenregion (Hyporhithral groß) bis oberhalb von Wartberg. Die untere Forellenregion (Metarhithral) erstreckt sich bis Inzersdorf. Der Oberlauf entspricht der oberen Forellenregion (Epirhithral). Das Einzugsgebiet der Krems erstreckt



Abbildung 2:
Übersicht Krems.

ins Mitteleuropäische Übergangsklima (Mittel- und Unterlauf). Es ist gekennzeichnet durch mittlere jährliche Niederschlagsmengen zwischen 1.800 mm (Oberlauf) und 900 mm (Unterlauf), Nordstaulagen sowie hohen Temperaturamplituden zwischen Sommer und Winter.

Die Krems ist über weite Strecken begradigt und reguliert, sowie von intensiver land- und wasserwirtschaftlicher Nutzung (Ausleitungen zur Bewässerung, Wasserkraftnutzung, etc.) beeinflusst. Nur wenige Abschnitte sind noch naturbelassen.

In der Studie wurde nicht der gesamte Flussverlauf betrachtet, Untersuchungsgegenstand war die Krems ab Flusskilometer 45 bis zur Mündung.

2 Beschattungsindex

Der Beschattungsindex, welcher die Beschattungsintensität von Fließgewässerabschnitten repräsentiert, wurde in Anlehnung an das von Li et al. (2012) entwickelte Modell SHADE2 berechnet. Das Modell beschreibt den Anteil der Beschattung in Abhängigkeit von Ort und Zeit sowie in Abhängigkeit der Eigenschaften des Gewässers und der angrenzenden Vegetation und wird über folgende Formel berechnet:

$$SG = \frac{SU_L + SU_R + SV_L * D_L + SV_R * D_R}{WB}$$

wobei SG der Anteil der beschatteten Gewässeroberfläche, SU_L die Länge des Schattens des linken Ufers auf der Gewässeroberfläche [m], SU_R die Länge des Schattens des rechten Ufers auf der Gewässeroberfläche [m], SV_L die Länge des Schattens der Vegetation am linken Ufer auf der Gewässeroberfläche [m], SV_R die Länge des Schattens der Vegetation am rechten Ufer auf der Gewässeroberfläche [m], D_L die Beschattungsdichte der Vegetation am linken Ufer [-], D_R die Beschattungsdichte der Vegetation am rechten Ufer [-] und WB die Wasserspiegelbreite [m] ist.

Der Anteil der beschatteten Gewässeroberfläche SG beschreibt die Abschirmung der direkten kurzwelligen Sonneneinstrahlung.

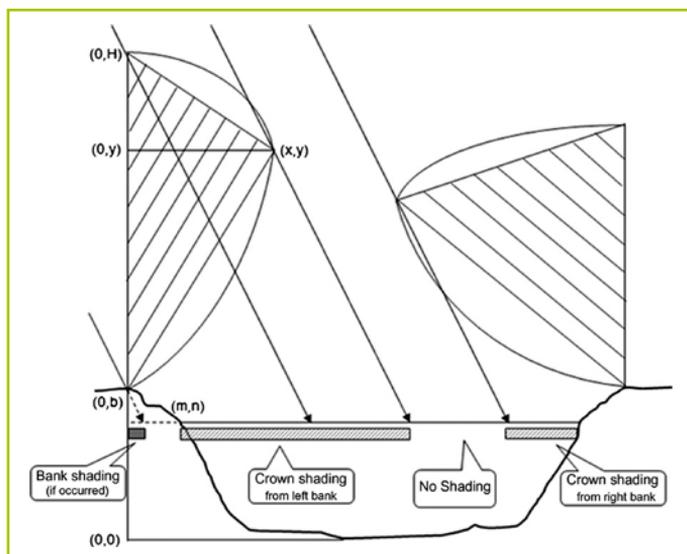


Abbildung 3: Schematisches Konzept der Vegetationsgeometrie als Dreiecke, über die Kronenhöhe (H), den Vegetationsüberhang (x) und der Höhe des maximalen Überhangs (y) (Lie et al. 2012).

Der Schattenwurf, zentrales Element des Modells, wird sowohl für das Ufer als auch für die Vegetation separat berechnet. Er definiert sich vor allem über den Sonnenstand sowie über die geometrischen Eigenschaften der Gewässerabschnitte und der Ufervegetation. Darin wird die Vegetation als »Dreieck« schematisch dargestellt (siehe *Abbildung 3*). Für diesen Ansatz sind daher neben der Vegetationshöhe, der Breite des Überhangs und der Höhe des maximalen Überhangs folgende Eingangsgrößen erforderlich:

Tabelle 1: Auflistung der, für die Berechnung des Beschattungsindex notwendigen, modellierten Parameter

Flussmorphologie	Vegetationsparameter	Sonnenstand
Wasserfläche (Anschlagslinie)	Vegetationshöhe	Azimuth
Gewässerbreite	Vegetationsdichte	Höhe
Fließrichtung	NDVI	Dauer
Uferhöhe	Höhe Vegetationsüberhang	Strahlungseintrag [Wh/m ²]
Uferneigung	Breite Vegetationsüberhang	
Höchster Punkt am Ufer	Distanz Vegetation – Wasserkante	
Distanz Ufer – Wasserkante	Flächenanteil Vegetation / Ufer	

Die für die Berechnung des Beschattungsindex benötigten Parameter (siehe Tabelle) konnten alle ausschließlich über GIS-Modellierungen anhand eines digitalen Oberflächenmodells, eines digitalen Geländemodells und RGBI Orthofotos näherungsweise für jedes Ufer separat, in 50 m Abschnitten, berechnet werden.

Li et al. (2012), DeWalle (2010) und Kalny et al. (2013) identifizierten die Vegetationshöhe, Vegetationsdichte, die Breite des Überhangs sowie die Ausrichtung des Gewässers als einflussreichsten Parameter bei der Berechnung der Fließgewässerschattung.

Aus den Abbildungen können die Ergebnisse der Beschattungsindex (BSI)-Modellierung für die Krems, Aschach, Faule Aschach und Dürre Aschach entnommen werden. Rein nach Betrachtung der Beschattungsindizes der 50 m-Profile geht klar hervor, dass die Krems einen wesentlich höheren Beschattungsgrad aufweist als die Aschach. Die Beschattungsindizes an der Krems zeigen einen deutlichen Süd-Nord Verlauf. Im Ober- und Mittellauf des Gewässers sind stark bis überwiegend beschattete Abschnitte dominant, während im Unterlauf (ab Flkm 18) die Beschattung nachlässt und erst im Mündungsbereich der Krems wieder ansteigt (*Abbildung 4*).

Aus der Analyse des BSI entlang der Krems lassen sich drei große Bereiche mit einer sehr hohen Einstrahlungsintensität und einer fehlenden Vegetation ableiten (*Abbildung 4*). Diese Bereiche konzentrieren sich vor allem um die größeren Ortschaften

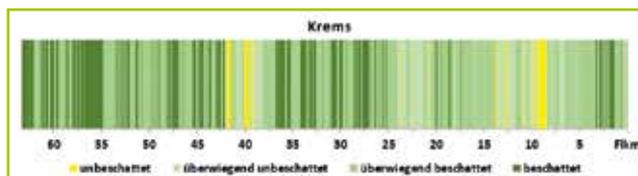


Abbildung 4:

Ergebnis der Beschattungsindexberechnungen für die Krems. Die unterschiedlichen Beschattungsindizes werden für den gesamten Flusslauf in 50 m breiten Gewässerabschnitten dargestellt.

Kremsdorf (bei Flkm. 9), Kematen an der Krems (zwischen Flkm. 20–25) und Wartberg an der Krems (zwischen Flkm. 39–42).

3 Referenzstrecken & Messsystematik

3.1 Referenzstrecken

Die Auswahl der Referenzstrecken für die Messung der Gewässertemperatur erfolgte über den berechneten Beschattungsindex. Dabei wurden solche Bereiche als Messabschnitte ausgewählt, die über eine große Länge durchgehend beschattet, überwiegend beschattet, überwiegend unbeschattet oder durchgehend unbeschattet sind (*Abbildung 5*). Die Auswahl der Referenzgebiete orientierte sich dabei an der Identifikation möglichst homogener Gewässerabschnitte, welche aus dem für den gesamten Flusslauf berechneten und im 50 m Intervall aufgereihten Beschattungsindex abgeleitet wurden. Jede Referenzstrecke weist eine Länge von mindestens 1 Kilometer auf. Insgesamt wurden an der Krems 12 Referenzabschnitte zur Analyse der Gewässertemperatur ausgewählt (siehe *Abbildung 6*).



Abbildung 5: Beispiele für die unterschiedlichen Beschattungstypen der Referenzstrecken. Links oben: eine beschattete Referenzstrecke. Rechts oben: eine überwiegend beschattete Referenzstrecke. Links unten: eine überwiegend unbeschattete Referenzstrecke. Rechts unten: eine unbeschattete Referenzstrecke.

Zusätzlich wurde der mögliche Einfluss von Zubringern auf das Temperaturregime der Krems untersucht. Hierfür wurden die drei größten Zubringer im Untersuchungsgebiet (Piberbach, Sulzbach und Sprinzenbach) bei den Temperaturmessungen mitberücksichtigt.

ID	Von km	Bis km	Typ
1	44,10	42,90	beschattet
2	40,45	39,25	überwiegend unbeschattet
3	34,05	32,40	überwiegend beschattet
4	32,40	31,50	beschattet
5	31,50	30,60	unbeschattet
6	30,35	29,05	beschattet
7	29,05	28,05	überwiegend beschattet
8	21,95	20,80	unbeschattet
9	20,80	19,60	überwiegend unbeschattet
10	19,60	18,60	überwiegend beschattet
11	15,10	14,05	überwiegend unbeschattet
12	9,60	8,25	unbeschattet

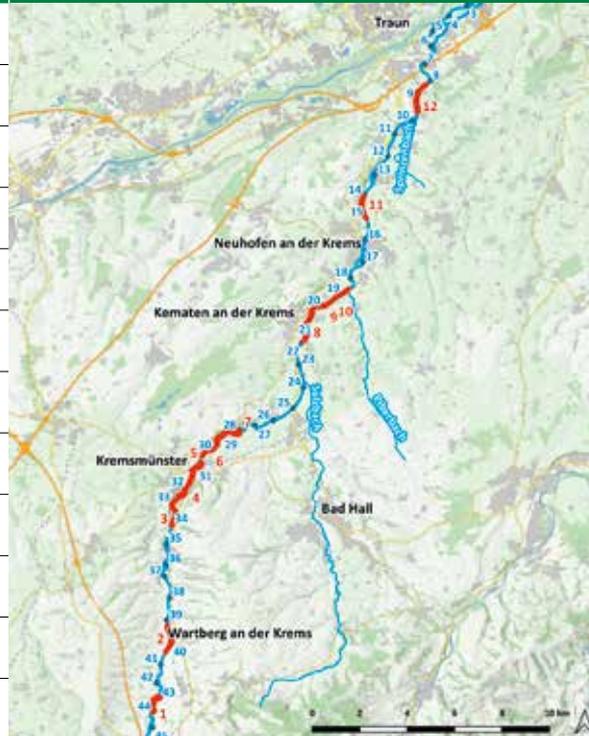


Abbildung 6: Übersicht und Auflistung über die Referenzgebiete an der Kriemsa.

Messsystematik

Um Auswirkungen von Beschattung bzw. fehlender Beschattung auf die Gewässertemperatur zu erfassen, wurden in der Studie, neben der Wassertemperatur, weitere Messgrößen aufgezeichnet:

- Wassertemperatur (26 Aufnahmepunkte in 12 Referenzgewässern und 3 Zubringern)
- Lufttemperatur & relative Feuchte (9 Aufnahmepunkte an, für den jeweiligen Referenzabschnitt repräsentativen Standorten)
- Globalstrahlung (4 Aufnahmepunkte)

Zusätzlich zu den eigenen Aufzeichnungen der gelisteten Messgrößen, wurden die stündlichen Werte der Lufttemperatur, relativen Feuchte, Globalstrahlung, Niederschlag und Sonnenscheindauer der Geosphere Austria- Messstation Kremsmünster in das Projekt integriert.

Die Wassertempersensoren wurden mithilfe einer Boje und einem Gegengewicht an der Gewässersohle, 15 cm unterhalb der Wasseroberfläche positioniert, um einen eventuellen Einfluss zuströmenden Grundwassers auszuschließen. Um den Temperaturverlauf innerhalb eines Referenzabschnittes zu erfassen, wurde jeweils am Anfang und am Ende eines jeden Abschnittes eine Temperatursonde installiert.

4 Ergebnisse Wassertemperaturen

Ausgewertet wurden die generellen Änderungen der Gewässertemperatur entlang der Gewässer sowie die Erwärmungsraten pro Kilometer in den unterschiedlich beschatteten Abschnitten mit Temperaturschwankungsbreiten und Taggängen.

Anhand der im Projektgebiet befindlichen Geosphere Austria Wetterstation, in Kombination mit eigenen Messdaten, wurden die für die Aussagen über den Einfluss der Beschattung relevanten Tage innerhalb der Messkampagnen identifiziert.

Die gewonnenen Daten wurden auf die Zeit zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang gefiltert, sowie strahlungsintensive Tage mit Lufttemperaturen über 28 °C und einer Sonnenscheindauer von mehr als 12 Stunden ermittelt. Als Kontrollgruppe zur Ermittlung der generellen Wassertemperaturerhöhungen, wurden bewölkte Tage mit einer Sonnenscheindauer unter 2,5 Stunden ermittelt. Um Auswirkungen von Zuflüssen bestimmen zu können, wurden relevante Zubringer mit Sensoren bestückt. Eine Validierung der gewonnenen Messdaten erfolgte im Zuge von Wartungsarbeiten durch zusätzliche Messungen per Hand, wodurch auch Informationen über weitere Einflussfaktoren gesammelt werden konnten.

4.1 Änderung Temperatur Gewässerverlauf

Anhand der gewonnenen Messdaten an den Gewässern, in Kombination mit dem modellierten Beschattungsindex, wurden Ursachen und Intensität der Erwärmung entlang des Gewässerverlaufes untersucht. Betrachtet man in Abbildung 7 den Verlauf der minimalen, maximalen und mittleren Wassertemperaturen gemittelt über die gesamte Messperiode 2022, so ist zu erkennen, dass die mittleren, als auch maximalen Wassertemperaturen an sonnigen Tagen deutlich über jenen der bewölkten Tage liegen. Die minimalen Wassertemperaturen sind hingegen an bewölkten Tagen höher. Somit wird der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Gewässertemperatur bestätigt, aber auch ein geringeres Abkühlungspotential in bewölkten Nächten aufgezeigt.

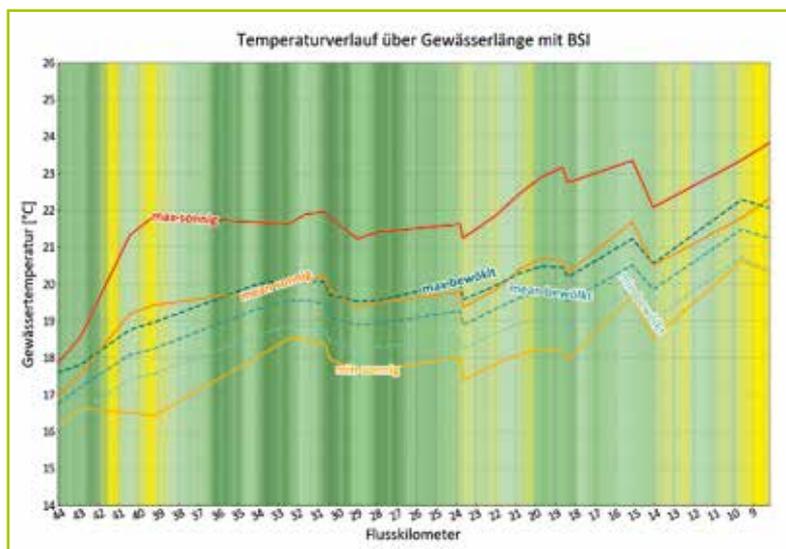


Abbildung 7: Maximale, minimale und mittlere Temperatur über den gesamten Messabschnitt gemittelt aller sonnigen Tage über 28 °C und aller bewölkten Tage, hinterlegt mit dem Beschattungsindex.

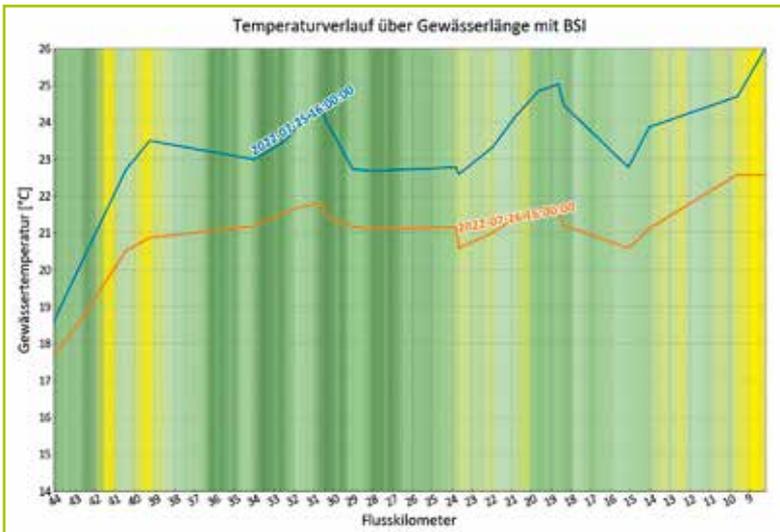


Abbildung 8: Temperaturverlauf über den gesamten Messabschnitt an einem sonnigen Tag und einem darauffolgenden bewölkten Tag, hinterlegt mit dem Beschattungsindex.

Stellt man einen sonnigen Tag einem direkt darauffolgenden bewölkten Tag gegenüber, zeigen sich bis zu 3 °C höhere Wassertemperaturen aufgrund der Sonneneinstrahlung (*Abbildung 8*). In beiden Grafiken ist der modellierte Beschattungsindex hinterlegt, wodurch sich starke Temperaturanstiege bei geringer Beschattung und relativ konstante Temperaturverläufe bis hin zu Abkühlungen bei guter Beschattung zeigen.

Ebenso kann eine dichte Ufervegetation, auch an bewölkten Tagen, die generelle Gewässererwärmung aufgrund hoher Lufttemperaturen dämpfen. Dies wird deutlich bei Betrachtung der Unterschiede in den lokalen Lufttemperaturen abhängig von der Beschattung (*Abbildung 9*). Diese Temperaturunterschiede sind zwar an sonnigen Tagen stärker ausgeprägt, aber führen auch an bewölkten Tagen zu einer deutlichen Dämpfung der Gewässererwärmung in gut beschatteten Abschnitten.

Dennoch zeigen sich auch in gut beschatteten Gewässerabschnitten Erwärmungen oder auch überproportionale Abkühlungen. Hierbei kommen weitere Einflüsse aus Zubringern, oder gegebener Gewässermorphologie durch wasserwirtschaftliche Nutzungen, sowie auch die Beschaffenheit des Umlandes ins Spiel.

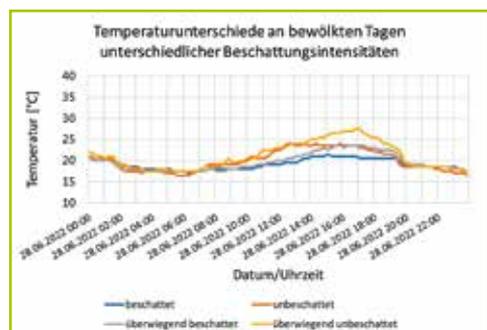
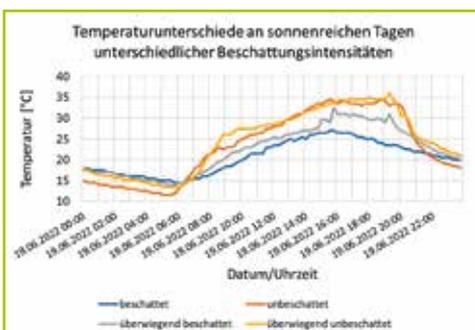


Abbildung 9: Lokale Lufttemperaturen bei unterschiedlicher Beschattung.

So kommt es in Abschnitten mit geringer Beschattung in Kombination mit wasserwirtschaftlichen Nutzungen bzw. Stau- und Restwasserstrecken, sowie hoher Siedlungsdichte zu den stärksten Temperaturanstiegen. Wie in *Abbildung 8* ersichtlich, führt dies an strahlungsintensiven Tagen bereits ab Flkm 39 zu Wassertemperaturen von über 23 °C gegen Ende Juli. Trotz wiederholter Abkühlungen kommt es im weiteren Gewässerverlauf der Kreams zu hohen Temperaturspitzen von über 24 °C zwischen Flkm 30 und 32 (Kremsmünster), bis zu 25 °C zwischen Flkm 18,5 und 19,5 (Kematen an der Kreams) und bis zu 26 °C ab Flkm 9,5 (Kremsdorf).

4.2 Temperaturverlauf mit Einzugsgebietsgröße

Um diese zusätzlichen Einflussfaktoren beurteilen zu können, werden in *Abbildung 10* Temperaturverläufe mit Zubringern sowie Stau- und Restwasserstrecken entlang der Kreams dargestellt. Im Oberlauf (Flkm 44 bis 39) kommt es durch eine Vielzahl kleiner Zubringer, geringe Beschattung und noch kleinen Abflüssen im Vorfluter zu sehr starken Temperaturanstiegen. Im weiteren Verlauf vermag es die gute Beschattung an strahlungsintensiven Tagen die Gewässertemperaturen konstant zu halten oder sogar abzukühlen. Wiederum starke Erwärmungen trotz Beschattung treten vorwiegend in Bereichen starker wasserwirtschaftlicher Nutzungen und in Siedlungsgebieten (Flkm 34 bis 31 – Kremsmünster und Flkm 23 bis 19 – Neuhofen an der Kreams) auf. Relevante Abkühlungen konnten vorwiegend durch Zuflüsse festgestellt werden. Nach den starken Erwärmungen bei Kremsmünster führen Grundwasserzuflüsse aus Hangwässern und eine sehr gute Beschattung (Flkm 31 bis 29) zu deutlichen Abkühlungen. Auch durch relevante Zubringer wie Sulzbach (Flkm 23,75) oder Piberbach (Flkm 18,65) konnten, wie die Messungen zeigen, konstante Abkühlungen der Kreams festgestellt werden. Beide Zubringer weisen eine durchwegs gute Beschattung auf. Auch kurze tiefe Staustrecken mit anschließend gut beschatteten Restwasserstrecken zwischen Flkm 19 und 22 haben kaum negative Auswirkungen. Sehr starke Erwärmungen an sonnigen Tagen konnten wiederum im schlecht beschatteten Gewässerabschnitt ab Flkm 10 im Siedlungsgebiet von Kremsdorf festgestellt werden. Hierbei trägt nicht nur die geringe Beschattung zur Erwärmung bei, sondern auch der im Vergleich zur Kreams deutlich wärmere Zufluss des schlecht beschatteten Sprinzenbaches. Somit wird deutlich, dass nicht nur die Beschaffenheit des Vorfluters und dessen Gewässermorphologie, sondern auch der Zustand der Zubringer von großer Bedeutung für den Temperaturhaushalt von Fließgewässern sind.

4.3 Temperatur im Tagesgang

Der Einfluss der Beschattung auf die Wassertemperatur zeigt sich auch bei der Gegenüberstellung eines Tagesverlaufes der Wassertemperatur an einem strahlungsintensiven Tag mit Beschattung und bei fehlender Beschattung deutlich (siehe *Abbildung 11*). So steigen die Wassertemperaturen bei fehlender Beschattung deutlich schneller an und erreichen höhere Maximalwerte. Dies zeigt auf, dass eine gute Beschattung über den gesamten Tagesverlauf geringere Wassertemperaturen, vor allem aber eine deutliche Dämpfung der Spitzentemperaturen ermöglicht.

4.4 Temperaturdifferenzen in Beschattungsklassen

Um Aussagen über Erwärmungen bei unterschiedlicher Beschattung zu ermöglichen, wurden die Erwärmungsraten pro Kilometer für die jeweilige Beschattungsgruppe

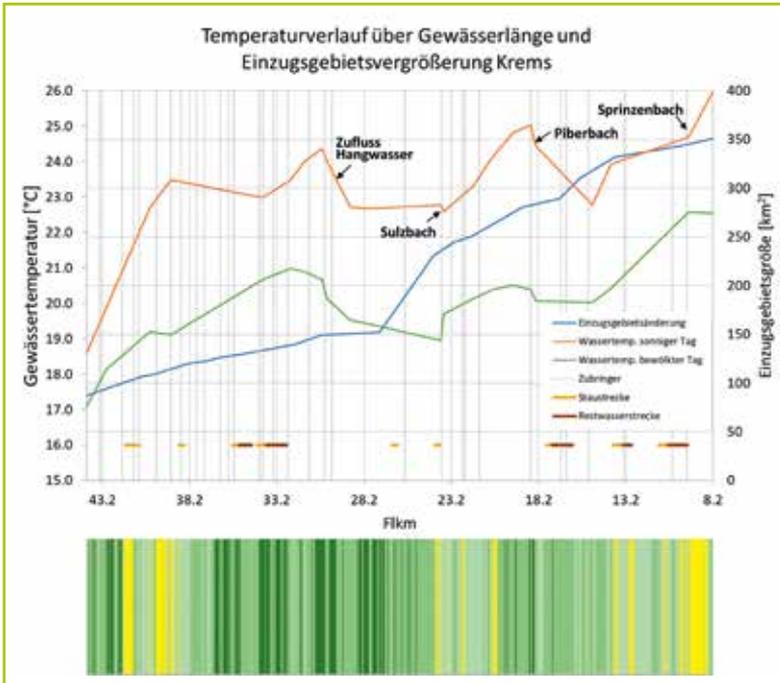


Abbildung 10: Temperaturverlauf an einem sonnigen Tag (orange) und einem bewölkten Tag (grün) mit Änderung der Einzugsgebietsgröße (blau), Zubringern (grau) und Stau- (gelb) bzw. Restwasserstrecken (rot), sowie dem dazugehörigen Beschattungsindex.

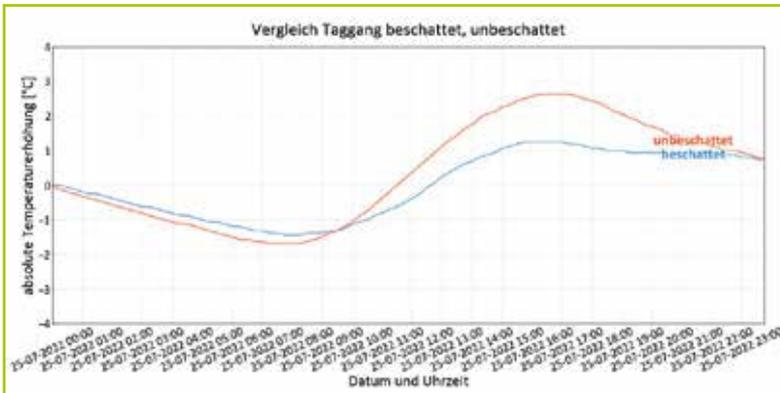


Abbildung 11: Tagesgang der Wassertemperatur in einem unbeschatteten (rot) und einem beschatteten (blau) Abschnitt.

bestimmt. So kommt es von Abkühlungen bei guter Beschattung, zu konstant größer werdenden Erwärmungsraten mit abnehmender Ufervegetation. Wie in *Abbildung 12* und *Abbildung 13* ersichtlich, konnten die deutlichen Unterschiede der Erwärmungsraten in Abhängigkeit von der Beschattung an beiden Gewässern, Kreams und Aschach, nachgewiesen werden.

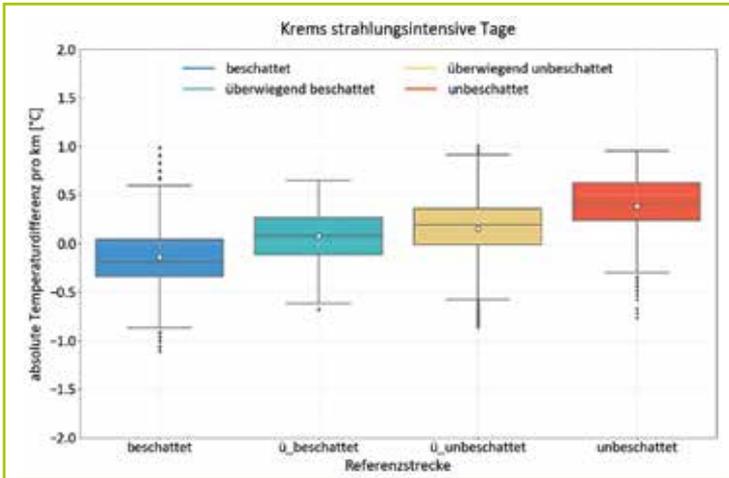


Abbildung 12: Absolute Temperaturdifferenzen pro km, zusammengefasst in die Gruppen unterschiedlicher Beschattungsintensität an sonnigen Tagen an der Krems.

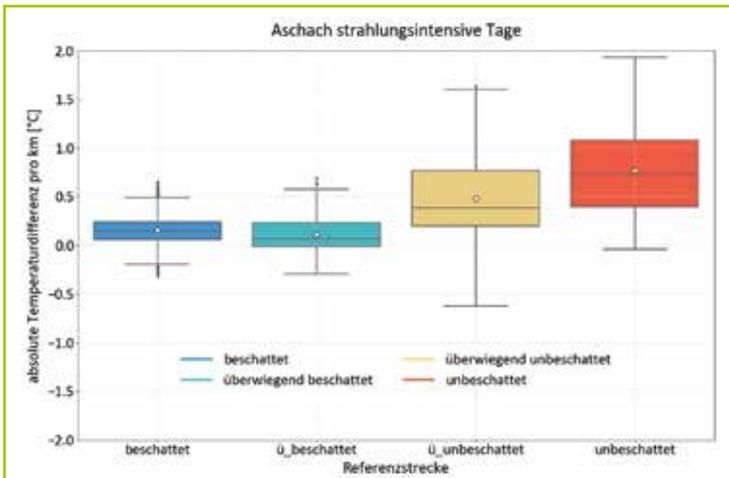


Abbildung 13: Absolute Temperaturdifferenzen pro Kilometer zusammengefasst in die Gruppen unterschiedlicher Beschattungsintensität an sonnigen Tagen an der Aschach.

Zur Differenzierung der Effekte der Sonneneinstrahlung, werden in Tabelle 2 die mittleren Erwärmungsraten pro Kilometer an sonnigen und bewölkten Tagen gegenübergestellt. Hier zeigt sich wieder die dämpfende Wirkung der Ufervegetation auch an bewölkten Tagen, aber auch die in etwa doppelt so starken Erwärmungsraten an Tagen mit hoher Strahlungsintensität. Ebenso wird das weitaus höhere Erwärmungspotential bei fehlender Beschattung deutlich.

Tabelle 2: Erwärmungsraten pro Kilometer an bewölkten und sonnigen Tagen.

	Bewölkte Tage	Sonnige Tage
Beschattet	im Mittel -0,080 °C/km	Im Mittel -0,140 °C/km
Überwiegend beschattet	Im Mittel +0,035 °C/km	im Mittel +0,076 °C/km
Überwiegend unbeschattet	Im Mittel +0,042 °C/km	Im Mittel +0,150 °C/km
Unbeschattet	im Mittel +0,249 °C/km	Im Mittel +0,380 °C/km

5 Diskussion

Die methodische Kombination aus Berechnung und Integration eines Beschattungsindex in eine ausgedehnte Feldstudie zeigt deutlich, welchen signifikanten Einfluss die Ufervegetation auf die Gewässertemperatur haben kann. Darüber hinaus konnte im Zuge der Studie ein Einblick in die komplexen Prozesse, welche zu Erwärmungen und auch Abkühlungen des Gewässers führen können, gewonnen werden.

So tragen neben der Beschattung auch die Orientierung des Fließgewässerabschnittes, die Fließgeschwindigkeit, Stau- oder Restwasserstrecken sowie der Einfluss von Zubringern maßgeblich zur Amplitude der Gewässertemperatur an der Krems bei (siehe Garner et al. 2017 & Lie et al. 2012). Während der Hitzeperioden im Sommer 2022 konnte an der Krems eine enorme Erwärmung im Gewässerverlauf von 18 °C im oberen Mittellauf auf über 26 °C im Unterlauf festgestellt werden. Die gewonnenen Daten zeigen aber auch ganz deutlich starke Unterschiede in den Erwärmungsraten im Gewässerverlauf, was die Komplexität hinter dem Temperaturhaushalt eines Gewässers verdeutlicht.

So steigt im schlecht beschatteten Oberlauf der Krems (Flkm 44 bis 39) die Gewässertemperatur bereits von 18 °C auf 22 °C. Im gut beschatteten Mittellauf (Flkm 39 bis 24) bleibt die Temperatur weitgehend konstant, während im weniger beschatteten Unterlauf die Wassertemperatur von 21,5 °C auf 24 °C steigt. Die absoluten Spitzenwerte treten jedoch in dicht besiedeltem Gebiet mit starker wasserwirtschaftlicher Nutzung und geringer Beschattung auf (Kremsmünster 24 °C, Kematen 25 °C, Neuhofen 26 °C). Darüber hinaus zeigt die Studie, dass Zubringer sowohl stark zu einer Abkühlung (Krems: Sulzbach, Piberbach) als auch zu Erwärmungen (Aschach: Sandbach, Krems: Sprinzenbach) führen können. In Hinblick auf Maßnahmen zur Klimawandelanpassung sind demnach auch die Zubringer in Maßnahmenüberlegungen miteinzubeziehen.

Ähnlich zur Studie von Moosmann et al. (2005) lassen sich aus den vorliegenden Aufzeichnungen der Gewässertemperatur große tageszeitliche Schwankungen in Abschnitten mit fehlender Beschattung und deutlich geringere Temperaturamplituden bei gut beschatteten Abschnitten herauslesen. Auffällig ist dabei, dass die Aschach im Vergleich zur Krems, viel stärker auf sonnige heiße Tage reagiert. So konnten an der Aschach tageszeitliche Temperaturschwankungen von über 4 °C innerhalb eines besonnten Gewässerabschnittes gemessen werden. Auch an der Krems zeigten sich deutliche Erwärmungen unbeschatteter Gebiete, allerdings betrug die maximale tageszeitliche Schwankung mit 2 °C nur in etwa die Hälfte der gemessenen Erwärmungen in der Aschach.

Die vorliegende Studie stimmt auch mit den Schlussfolgerungen aus anderen Studien überein (vgl. Hannah et al. 2008; Ryan et al. 2013) die feststellen, dass eingehende kurzwellige Strahlung eine der Hauptkomponenten des Energiehaushaltes von kleinen und mittleren Flüssen ist.

Eine wesentliche Erkenntnis aus der Studie und den darin gewonnenen Daten ist der dämpfende Effekt von Vegetation auf die Gewässertemperatur sowohl an sonnigen Tagen als auch an bewölkten Tagen.

Dies bewirkt nicht nur geringere Erwärmungen durch das Verhindern des Auftreffens direkter Sonneneinstrahlung, sondern auch geringere Erwärmungen durch langwellige Wärmestrahlung aufgrund der dämpfenden Effekte der Vegetation auf die lokalen Lufttemperaturen. Aufgrund der mittleren Erwärmungsraten, zusammen-

gefasst in die einzelnen Gruppen der Beschattungsintensität, zeigen sich die kühlenden bzw. dämpfenden Effekte an sonnigen als auch schattigen Tagen. So wäre bei einer zumindest überwiegenden Beschattung in den unbeschatteten und überwiegend unbeschatteten Referenzabschnitten eine Reduktion der Wassertemperatur im Unterlauf von 2 °C möglich. Die Auswirkungen einer vollkommenen Beschattung sind schwer abzuschätzen, da sich Abkühlungsraten ohne zuvor auftretende Erwärmungen ändern würden. Bei einer kompletten Beschattung aller schlechter beschatteten Abschnitte der gesamten Krems könnte die auftretende Temperaturerhöhung im Mittel um 5,7 °C gedämpft werden. Dies unterstreicht das Potential der Senkung von Wassertemperaturen durch die Ufervegetation und der damit einhergehenden Beschattung der Gewässer und deckt sich mit den Ergebnissen aus anderen Studien (Bowler et al. 2012).

Von Mitte der 1980er Jahre bis 2015 hat sich die Temperatur der Krems am Pegel Kremsdorf um rund 0,9°C und am Pegel Kremsmünster um 3,4 °C erhöht. Im Mittellauf der Aschach lag der Anstieg bei 2,5 °C. Dieser Trend hat sich seither noch verstärkt. Die massiven Temperaturerhöhungen im Mittellauf der Flüsse gehen vor allem zu Lasten der Lebensgemeinschaften des Hyporhithrals. Es zeigt sich vielfach eine Ausweitung des Epipotamals Richtung flussaufwärts, während hingegen die Fischarten des Hyporhithrals aufgrund ihrer Habitatansprüche ihr Verbreitungsgebiet meist nicht nach oben verschieben können. Die Erhöhung des Beschattungsgrades stellt neben der Verbesserung der Konnektivität mit dem kühleren Grundwasser an kleinen bis mittelgroßen Flüssen die wichtigste Maßnahme zur Dämpfung der durch den Klimawandel bedingten Erhöhung der Wassertemperaturen dar.

6 LITERATUR

- Beechie, T., Imaki, H., Greene, J., Wade, A., Wu, H., Pess, G., Roni, P., Kimball, J., Stanford, J., Kiffney, P. & Mantua, N. (2013): Restoring salmon habitat for a changing climate. *River Res. Appl.* 29 (8), 939–960.
- Booth, D.B. & Leavitt, J.L. (1999): Field evaluation of permeable pavement systems for improved stormwater management. *J. Am. Plann. Assoc.* 38 (3), 835–845.
- Bowler, D.E., Mant, R., Orr, H., Hannah, D.M. & Pullin, A.S. (2012): What are the effects of wooded riparian zones on stream temperature? *Environmental Evidence* 2012 1:3.
- DeWalle, Dr. (2010): Modeling stream shade: riparian buffer height and density as important as buffer width. *J Am Water Resour Assoc* 46: 323–333
- Dugdale, S.J., Malcolm, I.A., Kantola, K. & Hannah, D.M. (2018): Stream temperature under contrasting riparian forest cover. Understanding thermal dynamics and heat exchange processes. *Science of the Total Environment* 610–611, 1375–1389.
- Garner, G., Malcolm, I.A., Sadler J.P. & Hannah D.M. (2017): The role of riparian vegetation density, channel orientation and water velocity in determining river temperature dynamics. *Journal of Hydrology*, Volume 553, 471.
- Hannah D.M., Malcolm I.A., Soulsby C. & Youngson A.F. (2008): A comparison of forest and moorland stream microclimate, heat exchanges and thermal dynamics. *Hydrological Processes* 22, 919–940.
- Imholt, C., Soulsby, C., Malcolm, I.A. & Gibbins, C.N. (2013): Influence of contrasting riparian forest cover on stream temperature dynamics in salmonid spawning and nursery streams. *Ecology* 6, 380–392.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kalny (Holzapfel), G., Laaha, G., Melcher, A., Trimmel, H., Weihs, P. & Rauch, H. P. (2017): The influence of riparian vegetation shading on water temperature during low flow conditions in a medium sized river. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*. 5. 10.1051/kmae/2016037.
- Kurylyk, B.L., MacQuarrie, K.T.B., Linnansaari, T., Cunjak, R.A. & Curry, R.A. (2014): Preserving, augmenting, and creating thermal refugia in rivers concepts derived from research on the Miramichi River, New Brunswick (Canada). *Ecology*.

- Li, G., Jackson, C.R. & Kraseski, K.A. (2012): Modeled riparian stream shading: Agreement with field measurements and sensitivity to riparian conditions. *Journal of Hydrology* 428–429, 142–151.
- MacDonald, R.J., Boon, S., Byrne, J.M. & Sillins, U. (2014): A comparison of surface and subsurface controls on summer temperature in a headwater stream. *Hydrol. Process.* 28 (4), 2338–2347.
- Melcher, A., Dossi, F., Wolfram, G., Borgwardt, F., Schaufler, T., Kalny, G., Rauch, H.P., Formayer, H., Trimmel, H. & Weihs, P. (2016): Der Einfluss der Ufervegetation auf die Wassertemperatur unter gewässertypspezifischer Berücksichtigung von Fischen und benthischen Evertebraten am Beispiel von Lafnitz und Pinka. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft.* 68. 10.1007/s00506-016-0321-8.
- Moore, R.D., Spittlehouse, D.L. & Story, A. (2005): Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: A review. *Journal of the American Water Resources Association* 41 (4), 813–834.
- Moosmann, L., Schmid, M. & Wüest A. (2005): Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. EAWAG, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, 2005.
- Opperman, J.J., Luster, R., McKenney, B.A., Roberts, M. & Meadows, A.W. (2010): Ecologically functional floodplains: connectivity, flow regime, and scale. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 46 (2), 211–226.
- Poole, G.C. & Berman, C.H. (2001): An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused degradation. *Environ. Manage.* 27 (6), 787–802.
- Ryan, D.K., Yearsley, J.M. & Kelly-Quinn, M. (2013): Quantifying the effect of seminatural riparian cover on stream temperatures: implications for salmonid habitat management. *Fish. Manage. Ecol.* 20 (6), 494–507.
- Trimmel, H., Weihs, P., Leidinger, D., Formayer, H., Kalny, G. & Melcher, A. (2018): Can riparian vegetation shade mitigate the expected rise in stream temperatures due to climate change during heat waves in a human-impacted pre-alpine river?. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 437–461
- van Vliet, M.T.H., Vogele, S. & Rubbelke, D. (2013): Water constraints on European power supply under climate change: Impacts on electricity prices. *Environmental Research Letters* 8: 035010.
-